

文章编号: 0258-7106(2012)06-1326-11

辽西河坎子碱性侵入杂岩体及钼多金属矿床 同位素年代学研究*

刘勇^{1,2}, 聂凤军^{2*}, 方俊钦^{2,3}

(1 北京勘察技术工程有限公司, 北京 100085; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要 对辽西河坎子地区与碱性杂岩体相关的钼多金属矿床进行了同位素年代学研究。所获黑云母正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素加权平均年龄为 (235.3 ± 1.0) Ma, MSWD 值为 0.68。河坎子钼多金属矿床内辉钼矿的 Re-Os 同位素等时线年龄为 (224.0 ± 1.3) Ma, MSWD 值为 0.72。碱性杂岩体与相关的钼多金属矿床具有密切的空间关系, 两者的形成时间亦比较接近, 据此可推测, 河坎子碱性杂岩体与相关的钼多金属矿床均为印支期构造-岩浆作用及流体活动的产物。印支期内频繁的岩浆-热液活动为该区内钼、铜、金多金属元素的活化、迁移、富集提供了充足的热源条件。古大陆内部伸展构造环境中的碱性岩浆作用及流体活动为钼多金属矿床的形成提供了动力、物质和流体来源。

关键词 地球化学; 锆石 LA-ICP-MS 铀-铅年龄; 辉钼矿 Re-Os 同位素年龄; 钼多金属矿床; 碱性侵入杂岩体; 河坎子; 辽西

中图分类号: P618.65

文献标志码: A

Isotopic age dating of the alkaline intrusive complex and its related molybdenum polymetallic deposit at Hekanzi, western Liaoning Province

LIU Yong^{1,2}, NIE FengJun² and FANG JunQin^{2,3}

(1 Beijing Survey Technology Engineering Co. Ltd., Beijing 100085, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract

The newly discovered Hekanzi deposit is a medium-size porphyry molybdenum deposit in western Liaoning Province. Intrusive complexes are widely distributed in the study area, with the Mesozoic alkaline and calc-alkaline rocks being the most developed alkaline rocks. They intruded into the Precambrian and Paleozoic volcanic-sedimentary rocks in the forms of batholiths, stocks, and dykes. Alkaline intrusive rocks are mainly miascite, alkaline syenite and alkaline diabase. The calc-alkaline rocks are mainly granite porphyry, granodiorite, biotite granite and K-feldspar granite. Isotopic ages of the Hekanzi alkaline granite and its related Mo polymetallic deposit have been determined. The rock-forming age of the biotite-orthoclase granite is (235.3 ± 1.0) Ma with MSWD value of 0.68. Re-Os isotopic data of six molybdenite separates define a correlation line corresponding to

* 本文得到国家重点自然科学基金项目(编号:41030421)和地质调查项目(编号:1212010911029)的资助

第一作者简介 刘勇,男,1987年生,硕士研究生,主要从事金属矿床成矿规律研究。Email:liuyong_ustb@163.com

** 通信作者 聂凤军,男,1956年生,研究员,博士生导师,主要从事金属矿床和地球化学研究。Email:nfjj@mx.cei.gov.cn

收稿日期 2011-10-13; 改回日期 2012-06-01。许德焕编辑。

an age of (224.0 ± 1.3) Ma with MSWD value of 0.72. The metallic minerals in the ore are pyrite, chalcopyrite, molybdenite, pyrrhotite, marcasite and a little scheelite. Gangue minerals are mainly calcite, fluorite, garnet, serpentine, peridotite, dolomite, feldspar, plagioclase and quartz. The NE-trending, NS-trending and NW-trending fault zones are widely distributed in the alkaline intrusive complex and its related molybdenum polymetallic deposit at Hekanzi.

Key words: geochemistry, zircon LA-ICP-MS U-Pb dating, molybdenite Re-Os isotopic dating, molybdenum polymetallic deposit, alkaline intrusive complex, Hekanzi, western Liaoning Province

河坎子碱性侵入杂岩体(以下简称杂岩体)位于辽宁省西部凌源市河坎子乡境内,北距凌源市 90 km,地理坐标为东经 $119^{\circ}08'43'' \sim 119^{\circ}14'44''$,北纬 $40^{\circ}36'10'' \sim 40^{\circ}40'15''$ 。河坎子地区内各类侵入岩分布广泛,以碱性岩为主。物化探异常和钼(金)矿点星罗棋布,是找矿的有利地段,受到地质学界的关注。1974 年,余昌涛等将河坎子岩体确定为碱性杂岩体(李之彤等,1986)。李之彤等(1986)对该杂岩体进行了 K-Ar 同位素年龄测定,2 组样品的年龄值分别为 234 Ma 和 204 Ma。任康绪等(2004)对该杂岩体的地球化学特征进行了系统研究,讨论了代表性岩体的稀土元素、微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素特征,并探讨了其成岩物质来源。吴福元等(2006)对该杂岩体中的霞石正长岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定,结果为 (227 ± 2) Ma。

尽管早在 20 世纪 80 年代就有人发现在杂岩体中存在有金、钼和铅-锌矿化点,但未见有关于矿床的报道。2006 年,辽宁省有色地质局一〇九队在前人工作基础上,通过系统的地质调查和物化探测量,在该杂岩体内找到了一处具有工业价值的钼多金属矿床^①。

由于该矿床发现得较晚,故尚未对其进行过系统的成矿理论研究和同位素测年工作。本文对该杂岩体及相关的钼多金属矿床进行了同位素年代学研究,旨在查明该杂岩体与矿床之间的成因联系,从而有助于隐伏矿床的找矿勘查工作。

1 区域地质背景

在大地构造位置上,河坎子碱性杂岩体处于华北克拉通北部燕山台褶带,其南侧为山海关古隆起,北侧为北票断陷带,属华北克拉通北缘燕辽钼-铜-金成矿带。

该地区内,NE 向、近 SN 向和 NW 向断裂带广泛分布,以 NE 向断裂带最为发育(图 1)。

研究区内各类侵入岩分布广泛,以中生代碱性岩和钙碱性岩最为发育,大多呈岩基、岩株和岩脉侵入到前寒武系和古生界火山-沉积岩中,并被侏罗系火山-沉积岩不整合覆盖。

区内矿化蚀变极其发育,在杂岩体内部及其接触带,广泛发育钼、铜、金等多金属矿化,矿床(点)成群成带产出。在河坎子杂岩体的西、南侧有铤尖、马圈子等金矿床,在其北西及北侧有柏杖子、毛家店、杨杖子等金铜多金属矿点(图 1)。

2 矿床地质特征

河坎子矿区内,出露的地层有中元古界长城系、蓟县系和上元古界青白口系火山-沉积岩,局部地段见有奥陶系沉积岩。上述地层大多被中生界所覆盖。侵入岩呈岩基、岩株及岩脉产出,岩性主要为各种碱性正长岩、偏碱性花岗岩、花岗闪长岩等(图 2)。

矿区内已发现 3 条钼矿化带,包含 12 条金矿化带。矿化大多产在碱性侵入杂岩体蚀变破碎带内,其强度与节理-裂隙带的规模呈正相关关系。

金矿化带可划分为 2 条金矿化带,包含 12 条金矿化体。I 号金矿化带长 2700 m,呈 NE 走向,向 NW 或 SE 倾斜,倾角 $65 \sim 80^{\circ}$ 。II 号金矿化带长 660 m,呈 NE 走向,向 NW 或 SE 倾斜,倾角 $65 \sim 75^{\circ}$ 。12 条金矿化体的 $\alpha(\text{Au})$ 为 $(1.30 \sim 7.00) \times 10^{-6}$ 。金矿化体单体长 50~100 m,宽 0.30~1.00 m。

钼矿化带可划分为 3 条钼矿化带,包含 20 条钼矿化体。I 号矿化带长 1600 m,宽 50~140 m,NE 走向,向 SE 倾斜,倾角 $50 \sim 65^{\circ}$ 。II 号矿化带长 250 m,宽 20~60 m,NW 走向,向 NE 倾斜,倾角 $50 \sim 65^{\circ}$ 。III 号矿化带长 150 m,宽 50 m,走向 $330 \sim 350^{\circ}$,

① 辽宁省有色地质局一〇九队. 2008. 辽宁省凌源河坎子钼多金属矿床调查报告. 内部资料.

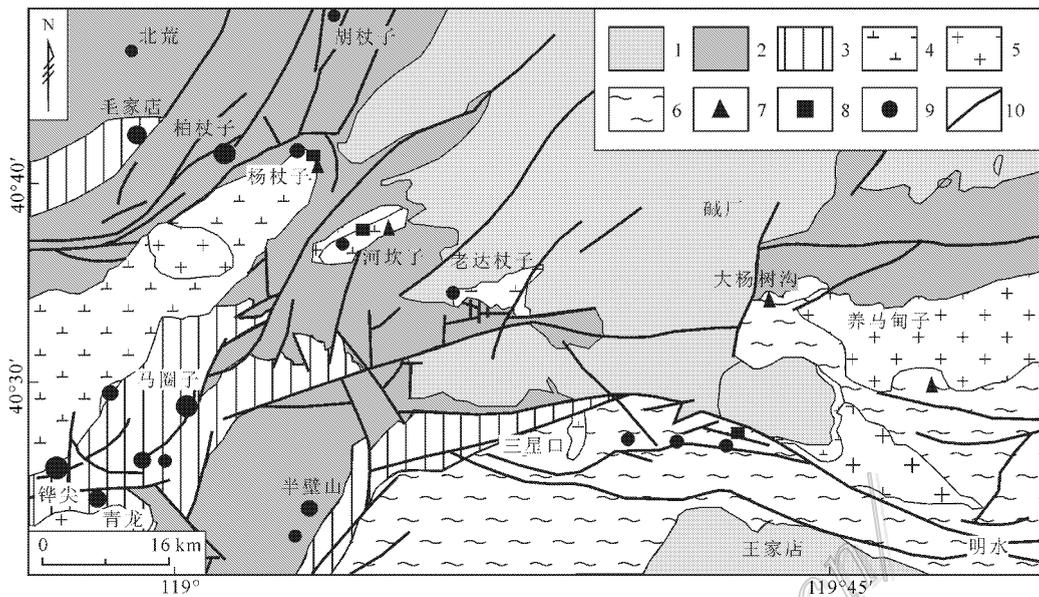


图1 河坎子区域地质简图(据辽宁省有色地质局一〇九队 2008^①)

1—中生界;2—古生界—元古界;3—太古界;4—闪长岩;5—花岗岩;6—混合岩、混合花岗岩;7—钼矿点;
8—铜矿点;9—金矿点;10—断裂

Fig. 1 Regional geological sketch map of Hekanzi area (after No. 109 Geological Party, Bureau of Non-ferrous Geology of Liaoning Province, 2008)

1—Mesozoic; 2—Palaeozoic-Proterozoic; 3—Archean; 4—Diorite; 5—Granite; 6—Migmatite, migmatitic granite;
7—Mo ore spot; 8—Cu ore spot; 9—Au ore spot; 10—Fault

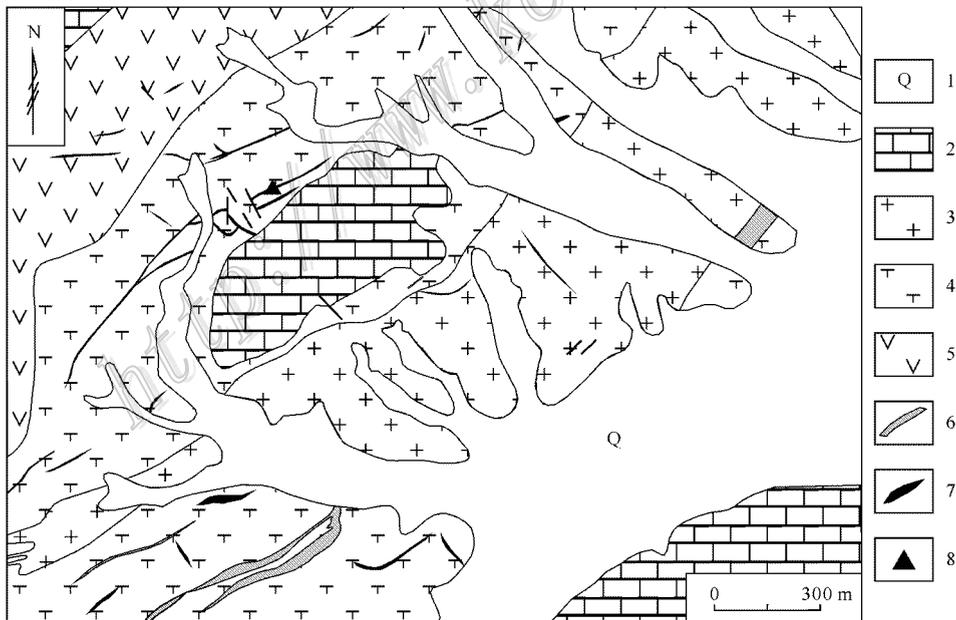


图2 河坎子矿区地质简图(据辽宁省有色地质局一〇九队 2008^①)

1—第四系;2—雾迷山组白云质灰岩;3—黑云母正长花岗岩;4—霞石正长岩;5—花岗闪长岩;6—似斑状花岗岩;7—矿脉;
8—辉钼矿采样位置

Fig. 2 Schematic geological map of the Hekanzi ore district
(after No. 109 Geological Party, Bureau of Non-ferrous Geology of Liaoning Province, 2008)

1—Quaternary; 2—Dolomitic limestone of Wumishan Formation; 3—Biotite syeno-granite; 4—Nepheline syenite; 5—Granodiorite;
6—Porphyritic granite; 7—Ore vein; 8—Location of molybdenite sample

① 辽宁省有色地质局一〇九队. 2008. 辽宁省凌源河坎子钼多金属矿床调查报告. 内部资料.

倾向 NE, 倾角 50~65°。20 条钼矿化体中, 有 6 条的 $w(\text{Mo})$ 为 0.03%~0.12%, 其余 14 条钼矿化体的 $w(\text{Mo})$ 为 0.01%~0.03%。钼矿化体单体宽度为 0.10~1.50 m, 长度为数米至数十米。

金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、磁黄铁矿和白铁矿及少量白钨矿。脉石矿物有方解石、萤石、石榴子石、透辉石、橄榄石、白云石、正长石、斜长石和石英。围岩蚀变主要有硅化、矽卡岩化、钠长石化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化和高岭土化。

3 岩相学特征

样品 HKZ-3、HKZ-9、HKZ-15(透辉霞石正长岩)(图 3) 透辉石(Di)常呈自形-半自形柱状, 其边缘常有一圈钠铁闪石或角闪石(Hbl)的反应边。霞石(Ne)被正长石(Kfs)交代呈残留体状分布在正长石中, 而且, 霞石已蚀变, 被黏土矿物交代。角闪石或钠铁闪石呈他形粒状, 分布在透辉石边缘。黑云母(Bt)呈自形叶片状。副矿物磷灰石(Ap)含量较多, 呈自形小柱状。正长石多呈他形板状, 少量呈自形-半自形板状。见有少量斜长石(Pl)。矿物粒度一般为 0.5~2 mm。

样品 HKZ-12(透辉霞石粗面岩)(图 4) 岩石中斑晶矿物种类较多且复杂, 反映出熔浆在冷却结晶过程中变化复杂。透辉石(Di)斑晶边缘常见一圈钠铁闪石(Hbl)反应边。偶见残留的自形霞石(Ne)斑晶。斜长石(Pl)斑晶内部具弱环带构造, 其外常有一圈正长石(Kfs)环绕。黑云母(Bt)斑晶呈自形叶片状。斑晶粒度一般为 2~5 mm。基质中可见残留的蚀变霞石。钠铁闪石呈半自形-他形细粒状均匀分布。矿物粒度一般为 0.1~1 mm。

样品 HKZ-31、HKZ-32(金云母辉石岩)(图 5) 主要由透辉石(Di)、榎石和金云母(Phl)组成, 含少量斜长石(Pl)、磷灰石(Ap)、钛铁矿等。透辉石呈半自形-他形粒状、短柱状。金云母呈自形-半自形叶片状或他形鳞片状。斜长石含量较少, 呈他形充填于暗色矿物颗粒之间。磷灰石一般呈自形-半自形小晶体, 分布于金云母之中。矿物粒度一般为 1~2 mm, 少量为 2~4 mm。

样品 HKZ-35(细粒斑状黑云母辉石正长岩)(图 6a、b) 具多斑结构。正长石呈 5~10 mm 或大于 10 mm 的粗粒晶体, 占岩石总量的 50% 以上。个别辉

石(Di)、黑云母(Bt)晶体较大, 可达 5 mm 左右。基质矿物粒度极不均匀, 一般暗色矿物, 如角闪石(Hbl), 为 0.5~2 mm, 浅色矿物, 如正长石(Kfs)、斜长石(Pl), 有部分为 0.5~2 mm, 部分仅 0.1 mm 左右。

样品 HKZ-36(黑云母闪长岩)(图 6c、d) 透辉石(Di)含量很少, 偶见被包裹在角闪石(Hbl)中。角闪石呈半自形柱状, 黑云母(Bt)呈半自形-他形板状, 这 2 种矿物之间界线不清。总体上, 正长石(Kfs)略多于斜长石(Pl)。斜长石双晶不发育, 具弱环带构造, 推断为奥-中长石。矿物粒度一般为 1~5 mm。

4 样品采集及分析方法

4.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

用于锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定的样品 HKZ-2 采自含矿的黑云母正长花岗岩。岩石风化后呈红到红褐色, 似斑状结构, 块状构造。斑晶以正长石为主, 石英含量较少, 基质矿物有正长石、斜长石、石英、黑云母, 蚀变矿物有绢云母、绿泥石和高岭石。

样品分选采用常规方法进行。先将样品粉碎至 80~100 目, 用浮选和电磁选方法进行分选, 然后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。将选出的锆石样品置于环氧树脂中, 然后磨至约一半, 使锆石内部暴露, 用于阴极发光(CL)研究和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素组成测试。

阴极发光研究在中国地质科学院地质研究所运用电子探针仪完成。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素组成测试在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 测试仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Neptune UP 213 激光剥蚀系统。测试的详细过程参见有关文献(Hoskin et al., 2000; Liu et al., 2008; 侯可军等, 2009)。

4.2 辉钼矿 Re-Os 同位素测年

用于 Re-Os 同位素年龄测定的 6 件辉钼矿样品均采自 DZK01-2 钻孔的岩芯, 采样位置为钻孔深度 500~600 m 处。辉钼矿大都呈鳞片状集合体镶嵌在黑云母正长花岗岩中, 局部地段与黄铁矿和黄铜矿呈现出共生结构关系。

辉钼矿样品是采用特制工具直接从手标本上获取的, 在实体显微镜下进行了仔细检查, 每件辉钼矿样品的纯度(体积分数)均大于 98%。样品测试在国家地质实验测试中心铼-钨同位素实验室完成, 测试仪器为 PQ Excell ICP-MS。铼-钨同位素测试的原

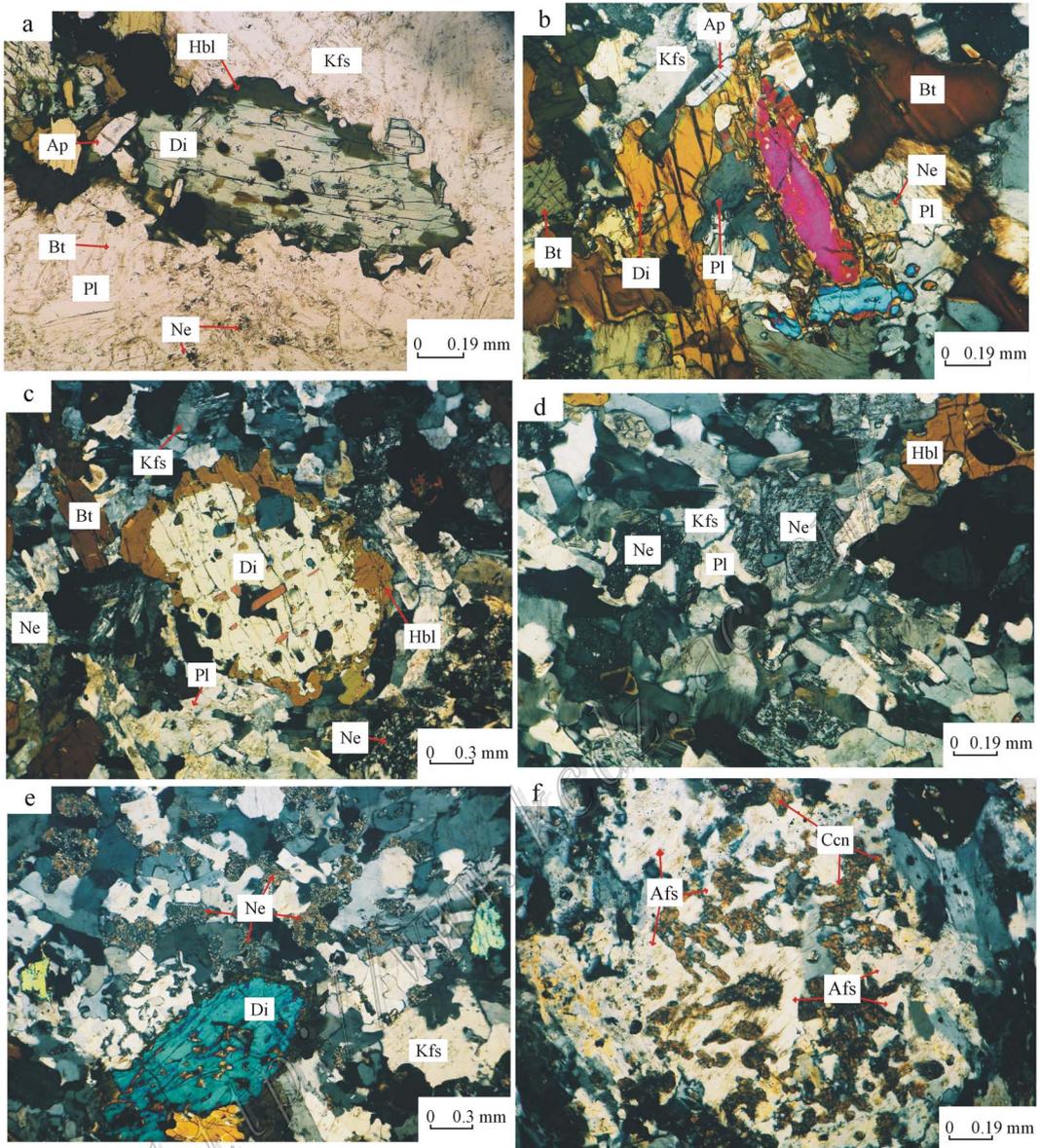


图3 河坎子矿区样品 HKZ-3、HKZ-9 和 HKZ-15(透辉霞石正长岩)显微镜下照片

a, b. 样品 HKZ-3; c, d. 样品 HKZ-9; e, f. 样品 HKZ-15;

Fig. 3 Microscope photographs of HKZ-3, HKZ-9 and HKZ-15 samples of diopside nepheline syenite from the Hekanzi ore district

a, b. Sample HKZ-3; c, d. Sample HKZ-9; e, f. Sample HKZ-15

理和详细方法参见有关文献(Du et al., 2004; 屈文俊等, 2003; 2004)。

5 测试结果

5.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

河坎子钼多金属矿床含钼黑云母正长花岗岩中

锆石的 CL 图像详见图 7。多数锆石颗粒为短柱状、锥状, 粒径为 70~150 μm ; 其内部结构较为清晰, 大部分具有明显的韵律环带, 与典型岩浆结晶锆石的特征相似, 应属于岩浆成因锆石。个别锆石颗粒边部出现不完整的浅色边, 可能是受热液蚀变影响所致。

对黑云母正长花岗岩样品 HKZ-2 进行了锆石

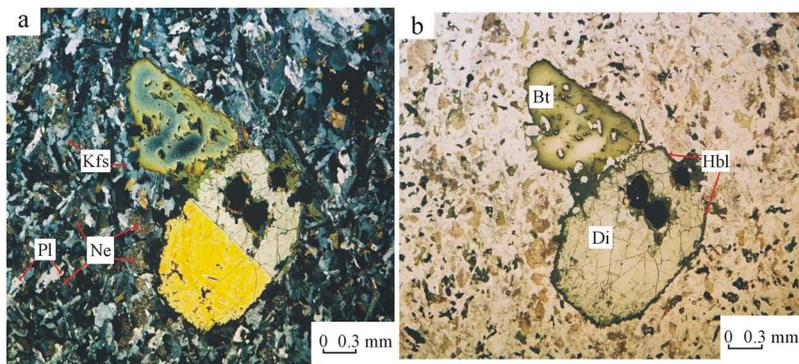


图 4 河坎子矿区样品 HKZ-12(透辉霞石粗面岩)的显微镜下照片

Fig. 4 Microscope photographs of HKZ-12 sample of diopside nepheline trachyte from the Hekanzi ore district

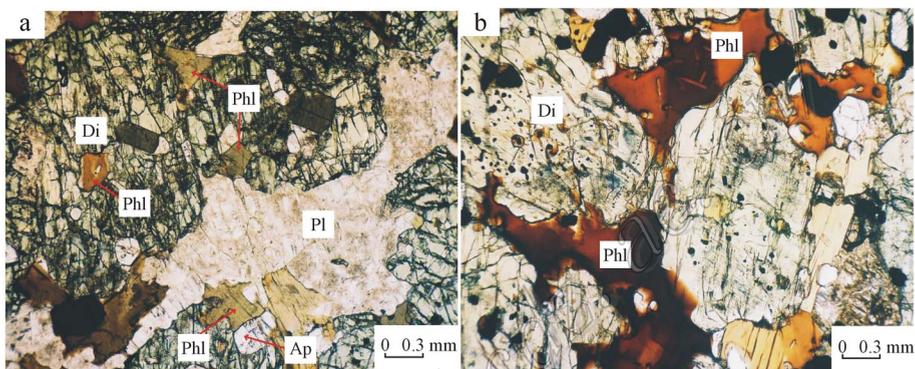


图 5 河坎子矿区样品 HKZ-31(a)和 HKZ-32(b)(透辉霞石粗面岩)显微镜下照片

Fig. 5 Microscope photographs of HKZ-31(a) and HKZ-32 (b) samples of diopside nepheline trachyte from the Hekanzi ore district

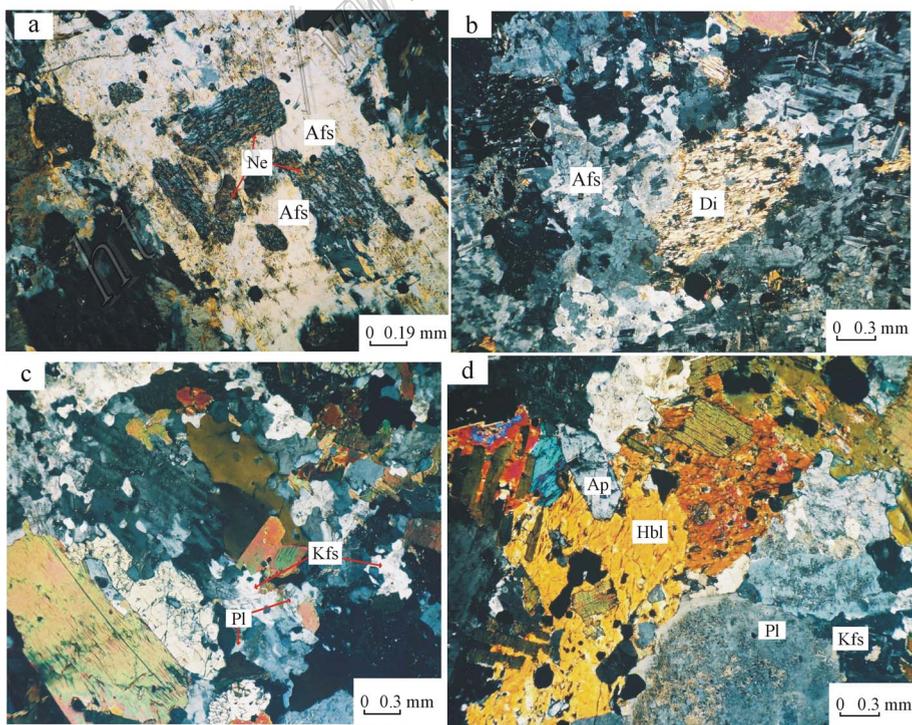


图 6 河坎子矿区样品 HKZ-35 和 HKZ-36 显微镜下照片

a, b. 细粒斑状黑云母辉石正长岩(样品 HKZ-35); c, d. 黑云母闪长岩(样品 HKZ-36)

Fig. 6 Microscope photographs of HKZ-35 and HKZ-36 samples from the Hekanzi ore district
a, b. Fine-grained porphyritic biotite pyroxene syenite(sample HKZ-35); c, d. Biotite diorite(sample HKZ-36)

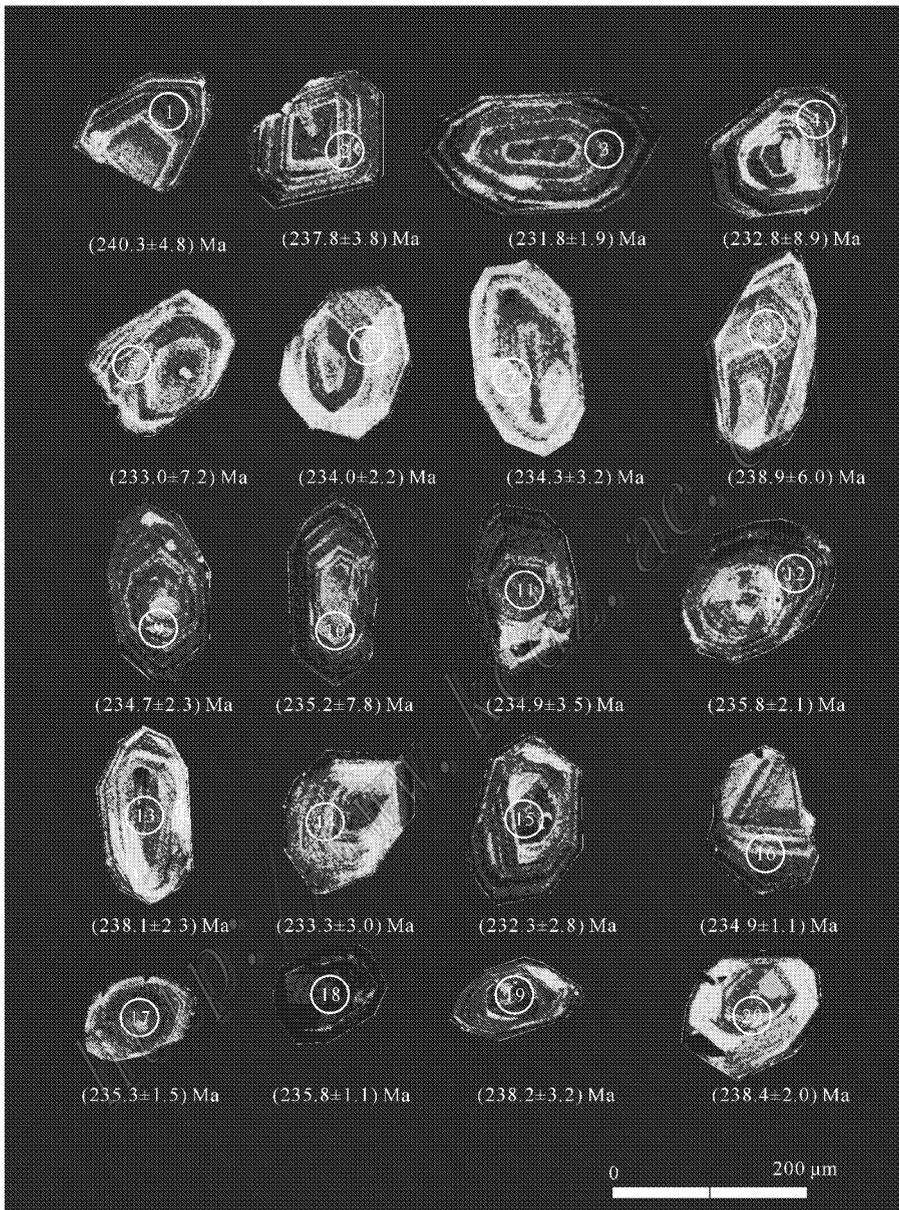


图 7 河坎子矿区黑云母正长花岗岩(HKZ-2)内锆石阴极发光图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 7 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircon in biotite syenogranite(sample HKZ-2) from the Hekanzi ore district

LA-ICP-MS U-Pb 同位素组成分析,共完成了 20 粒锆石 20 个测点的测试,测试结果见表 1 和图 8。由表 1 可见 样品的 $w(\text{Th})$ 和 $w(\text{U})$ 分别为 $(159.8 \sim 1185.9) \times 10^{-6}$ (平均 320.2×10^{-6}) 和 $(278.2 \sim 655.8) \times 10^{-6}$ (平均 410.8×10^{-6}), Th/U 比值为 $0.54 \sim 1.37$ (平均 0.73)。这表明所测锆石属岩浆型

锆石。用 Isoplot 3.0 程序对锆石测试数据进行了谐和曲线的投影和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄的计算。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图 8)中,样品锆石数据点投落在谐和线上或其附近的一个很小的区域内,所得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(235.3 \pm 1.0) \text{ Ma}$ (MSWD 值为 0.68) (图 8)。

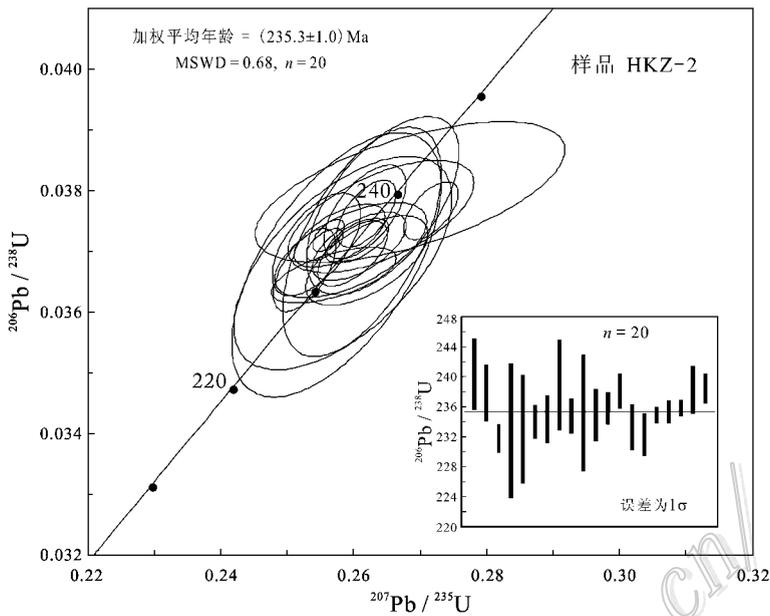


图 8 河坎子矿区黑云母正长花岗岩内锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和谐图

Fig. 8 LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram of zircon in biotite syenogranite from the Hekanzi ore district

表 1 河坎子矿区黑云母正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS isotopic data of zircon in biotite syenogranite from the Hekanzi ore district

点号	$\alpha(\text{Pb}_{\text{总}})$ /%	$\alpha(^{232}\text{U})$ / 10^{-6}	$\alpha(^{238}\text{Th})$ / 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}/\text{Ma}$	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ
1	17.282	276.36	388.75	0.7109	0.0512	0.0026	0.2684	0.0153	0.0379	0.0007	240.28	14.125
2	16.470	249.71	455.90	0.5477	0.0503	0.0009	0.2641	0.0092	0.0375	0.0006	237.77	13.321
3	11.589	166.47	278.23	0.5983	0.0506	0.0009	0.2570	0.0061	0.0366	0.0003	231.77	6.4730
4	14.187	220.43	337.25	0.6536	0.0508	0.0012	0.2573	0.0103	0.0367	0.0014	232.82	8.6852
5	10.572	179.37	305.97	0.5863	0.0516	0.0017	0.2583	0.0108	0.0368	0.0011	233.01	13.143
6	17.879	303.87	383.11	0.7932	0.0509	0.0004	0.2598	0.0034	0.0369	0.0003	233.994	4.4522
7	13.140	230.17	309.34	0.7441	0.0505	0.0008	0.2595	0.0075	0.0370	0.0005	234.34	5.0929
8	14.912	231.55	370.21	0.6255	0.0510	0.0007	0.2643	0.0075	0.0377	0.0009	238.87	49.136
9	19.382	309.41	481.00	0.6433	0.0510	0.0007	0.2608	0.0046	0.0370	0.0003	234.73	5.0539
10	19.205	287.71	526.22	0.5468	0.0660	0.0122	0.2612	0.0078	0.0371	0.0012	235.17	178.95
11	16.467	231.27	361.17	0.6403	0.0496	0.0003	0.2543	0.0043	0.0371	0.0005	234.92	5.2480
12	18.199	255.30	414.81	0.6155	0.0501	0.0007	0.2578	0.0045	0.0372	0.0003	235.80	5.2436
13	41.849	832.30	605.33	1.3750	0.0505	0.0003	0.2619	0.0029	0.0376	0.0003	238.06	4.4653
14	17.540	262.00	418.45	0.6261	0.0515	0.0005	0.2619	0.0060	0.0368	0.0004	233.28	5.8752
15	15.022	241.06	373.95	0.6446	0.0500	0.0004	0.2526	0.0030	0.0366	0.0004	232.29	4.7028
16	17.772	279.48	424.87	0.6578	0.0499	0.0002	0.2556	0.0018	0.0371	0.0001	234.88	4.5971
17	14.233	217.58	362.18	0.6008	0.0508	0.0004	0.2605	0.0031	0.0371	0.0002	235.28	5.7104
18	17.479	283.65	475.24	0.5969	0.0498	0.0002	0.2561	0.0015	0.0372	0.0001	235.82	4.4133
19	56.459	1185.90	655.75	1.8086	0.0504	0.0004	0.2616	0.0040	0.0376	0.0005	238.24	4.8543
20	11.014	159.79	288.62	0.5536	0.0523	0.0003	0.2716	0.0026	0.0376	0.0003	238.36	6.0975

5.2 辉钼矿 Re-Os 同位素测年结果

河坎子矿区 6 件辉钼矿样品的 Re-Os 同位素组成测试数据及模式年龄值列于表 2, 根据 $\alpha(^{187}\text{Re})$ 和 $\alpha(^{187}\text{Os})$ 绘制的等时线年龄图见图 9。

由表 2 可见, 6 件辉钼矿样品的 $\omega(\text{Re})$ 为 $(20.91 \sim 54.28) \times 10^{-6}$, 平均为 34.84×10^{-6} ; $\alpha(^{187}\text{Os})$ 为 $(49.22 \sim 126.2) \times 10^{-6}$, 平均为 81.80×10^{-6} ; $\alpha(\text{普Os})$ 为 $(0.10 \sim 1.14) \times 10^{-6}$, 平均为

表2 河坎子矿区辉钼矿铼-钨同位素测定结果

Table 2 Re-Os isotopic data of molybdenite from the Hekanzi ore district

原样名	m/g	$\alpha(\text{Re})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		$\alpha(\text{普通Os})/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		$\alpha(^{187}\text{Re})/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		$\alpha(^{187}\text{Os})/\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
HKZ-23	0.05036	23.42	0.18	0.3175	0.0422	14.72	0.11	55.32	0.47	225.1	3.1
HKZ-17	0.03025	39.21	0.38	1.145	0.133	24.64	0.24	92.24	0.93	224.3	3.6
HKZ-20	0.03048	54.28	0.45	0.0274	0.0435	34.12	0.29	126.2	1.10	221.5	3.2
HKZ-23	0.01078	22.27	0.18	0.2811	0.0847	13.99	0.11	52.19	0.50	223.4	3.3
HKZ-26	0.03030	20.91	0.16	0.1720	0.0297	13.14	0.10	49.22	0.41	224.4	3.1
HKZ-27	0.03026	48.92	0.46	0.0977	0.0297	30.75	0.29	115.6	0.9	225.3	3.3

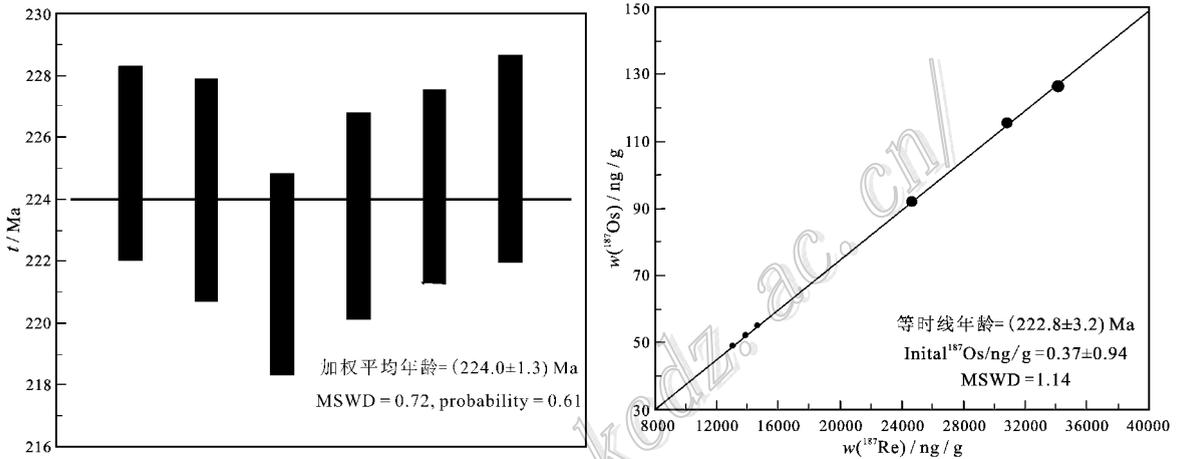


图9 河坎子钼多金属矿床辉钼矿铼-钨等时线年龄和加权平均年龄

Fig. 9 Re-Os isochron and weighted average age of molybdenite from the Hekanzi ore district

0.34×10^{-6} 。相对于放射性 ^{187}Os 而言,普通Os含量极低,可忽略不计。可认为河坎子矿区辉钼矿样品中的Os几乎全部为放射性成因。

Re-Os同位素测试结果表明,辉钼矿的模式年龄变化于 $(221.5 \pm 3.2)\text{Ma}$ ~ $(225.3 \pm 3.3)\text{Ma}$ 之间,加权平均值为 $(224.0 \pm 1.3)\text{Ma}$ (2σ)。在辉钼矿Re-Os同位素等时线图(图9)中,所有6件辉钼矿样品测试数据均排列在一条直线上,相关系数大于0.995,该直线对应的等时线年龄值为 $(222.8 \pm 3.2)\text{Ma}$ MSWD值为1.14。加权平均年龄与等时线年龄非常接近,表明本研究的Re-Os同位素测试结果的精度可信。

6 讨论

6.1 成岩成矿时代

目前通常认为,华北克拉通北缘钼矿床的形成时间主要集中在侏罗纪和白垩纪,并且与钙碱性岩

浆活动具有密切的成因联系(毛景文等,1999)。但少有研究者在印支期碱性侵入杂岩体发育区开展系统的钼矿床地质调查和评价工作。河坎子钼多金属矿床的找矿实践表明,在印支期碱性侵入杂岩体内,同样可以找到具有工业价值的钼矿床。

有些研究者(Cathles,1990;Cathles et al.,1997)指出,与单一侵入体有关的矿化,其岩体侵位、热液循环和矿化作用发生在很短的期间内(小于1Ma)。但是,许多矿床是多期岩浆和热液事件的结果,有些研究者提出,主成矿可能发生于侵入体侵位以后几Ma或十几Ma(Geissman et al.,1992;Kendrick et al.,2001)。关于河坎子矿床的成矿期次,早在20世纪80年代中期,李之彤等(1986)就指出,河坎子碱性杂岩体是多期次构造-岩浆活动的产物。根据不同期次岩体的相互穿切关系,可将岩体的形成过程划分为主侵入期和附加侵入期;主侵入期形成的岩石类型有各种碱性正长岩和霞石正长岩,附加侵入期形成的岩石类型有高钾钙碱性花岗岩类岩株及各

类岩脉。本次研究测得的与辉钼矿成矿有关的黑云母正长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为(235.3 ± 1.0) Ma, 与前人测得的霞石正长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(227 ± 2) Ma(吴福元等, 2006)相比, 两者相差了近 8 Ma, 这进一步说明了河坎子碱性杂岩体是多期次构造-岩浆活动的产物。

6.2 成矿物质来源

由于 Re 和 Os 的相容性不同(Martin et al., 1994), 导致在地幔分异和地球化学循环过程中, Os 趋于在地幔富集, 而 Re 则相对亲地壳。因此, 不同的地球化学储源库特别是地壳和地幔, 具有截然不同的 Re、Os 同位素特征。故而, Re-Os 同位素体系不仅可用来直接定年, 而且, 亦是成岩成矿物质来源强有力的示踪剂。

辉钼矿的铼含量对其物质来源具有指示意义。芮宗瑶等(2002)的研究发现, 产于深断裂带的与深源岩浆相联系的矽卡岩型和斑岩型矿床的辉钼矿中 Re 含量较高; 与壳源重熔岩浆相联系的伟晶岩型、云英岩型、矽卡岩型和斑岩型矿床的辉钼矿中 Re 含量相对较低。毛景文等(1999)在综合分析及对比了中国各种类型钼矿床中辉钼矿的 Re 含量之后认为: 从地幔到壳幔混源再到地壳, 矿石中的 Re 含量呈数量级下降, 从与地幔、I 型到 S 型花岗岩有关的矿床, 其 $\epsilon(\text{Re})$ 从 $(n \times 100) \times 10^{-6} \rightarrow (n \times 10) \times 10^{-6} \rightarrow n \times 10^{-6}$ (毛景文等, 1999)。因此, 辉钼矿的 Re 含量可以指示成矿物质来源。河坎子矿区辉钼矿的 $\epsilon(\text{Re})$ 为 $(20.91 \sim 54.28) \times 10^{-6}$, 平均为 34.84×10^{-6} 。目前, 对河坎子矿床的研究较薄弱, 还缺乏流体包裹体及稳定同位素特征等方面的数据, 因此, 对该矿床成矿物质来源尚不明确, 但可据其辉钼矿的 Re 含量进行初步推测, 其成矿物质应为壳幔混合来源。

6.3 成矿环境

二叠纪末期, 古亚洲洋的消失导致蒙古联合块体与华北克拉通的碰撞对接, 进而诱发了大规模的构造-岩浆活动。自三叠纪开始, 碰撞造山期后的伸展构造作用与岩石圈的拆沉机制以及软流圈上涌可造成大陆壳的部分熔融, 并且形成了含矿的碱性岩浆。

大规模成矿作用通常发育于后碰撞造山环境, 而不是同碰撞造山期间。在碰撞造山过程中的伸展松弛时期, 一方面, 由于伸展垮塌作用而达到较高温产生熔融作用, 另一方面, 玄武岩岩浆底侵, 下地

壳岩石经过多次熔融及同熔作用, 不仅形成了高度分异的富硅、富钾质花岗岩, 沿着区域性 EW 向、NE 向深大断裂上升, 而且, 伴随着大规模成矿事件的发生。

考虑到河坎子碱性杂岩体所在的地域位于西拉沐伦河深大断裂的西南处, 古板块碰撞后的伸展作用在河坎子及邻区的反映, 是形成了一系列 NE 向断裂带, 同时, 也产出了大量的碱性侵入岩。需要提及的是, 古生代强烈的构造-岩浆作用及相关的热液活动, 可导致前中生代基底岩(体)层中钼含量明显增高, 这也为后来钼矿床(点)的形成奠定了物质基础。

7 结 论

(1) 对河坎子杂岩体中与辉钼矿成矿作用密切相关的黑云母正长花岗岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定, 结果为(235.3 ± 1.0) Ma, MSWD 值为 0.68。这与前人所获全岩 Rb-Sr 等时线年龄、锆石 U-Pb 年龄和全岩黑云母 K-Ar 年龄相近, 进一步说明了河坎子碱性杂岩体是碰撞造山期后伸展环境下构造-岩浆活动的产物。

(2) 对河坎子钼多金属矿床中的辉钼矿进行了 Re-Os 年龄测定, 结果为(224.0 ± 1.3) Ma, MSWD 值为 0.72。这些辉钼矿大多在黑云母正长花岗岩及霞石正长岩内呈细脉状、网脉状、浸染状和团块状产出, 因此可推测, 黑云母正长花岗岩及钼矿体均是印支期碱性岩浆作用及相关流体活动的产物。

(3) 河坎子矿区的成岩作用与成矿作用在时间上有一定的间隔, 究其原因主要应为多期次构造-岩浆活动所致。

志 谢 本研究的野外地质调查与采样工作得到了辽宁省有色地质局一〇九队总工程师张志伟和工程师邵振波的大力支持, 谨表衷心感谢。

参考文献/References

- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.
- 李之彤, 余昌涛, 程德琳, 庞庆邦, 唐淑兰. 1986. 辽宁省凌源县河坎子碱性杂岩体地质特征[J]. 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所刊, 14: 43-62.

- 毛景文, 张作衡. 1999. 北祁连山小柳沟钨矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其意义[J]. 地质论评, 45(4): 412-417.
- 屈文俊, 杜安道. 2003. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 22(4): 254-257.
- 屈文俊, 杜安道. 2004. 电感耦合等离子体质谱测定辉钼矿中 Re-Os 含量时的质量分馏效应的校正[J]. 质谱学报, 25(增刊): 181-182.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 蔡剑辉, 李凤棠, 谭林坤, 邵宏翔, 李元崑, 储著银. 2004. 辽西凌源河坎子碱性杂岩体地球化学特征及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 23(3): 193-202.
- 芮宗瑶, 刘玉琳, 王龙生. 2002. 新疆东天山斑岩铜矿带及其大地构造格局[J]. 地质学报, 76(1): 83-94.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代[J]. 岩石学报(2): 315-325.
- Cathles L M. 1990. Scales and effects of fluid flow in upper crust[J]. Science, 248: 323-329.
- Cathles L M, Erendi A H J and Barrie T. 1997. How long can a hydrothermal system be sustained by a single intrusive event[J]? Econ. Geol., 92: 766-771.
- Du A D, Wu S Q, Sun D Z, Wang S X, Qu W J, Markey R, Stain H, Morgan J and Malinowski. 2004. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(1): 41-52.
- Geissman J W, Snee L W, Graaskamp G W, Carten R B and Geraghty E P. 1992. Deformation and age of red mountain intrusive system (Urad-Henderson molybdenum deposits), Colorado: Evidence from palaeomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 104: 1031-1047.
- Hoskin P W O and Black I P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. J. Metamorphic Geol., 18: 423-439.
- Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D and Turner G. 2001. Halogen and Ar-Ar age determinations of inclusions within quartz veins from porphyry copper deposits using complementary noble gas extraction techniques[J]. Chem. Geol., 117: 351-370.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257: 34-43.
- Martin C E, Carlson R W, Shirey S B, Frey F A and Chen C Y. 1994. Os isotopic variation in basalts from Haleakala Volcano, Maui, Hawaii: A record of magmatic processes in oceanic mantle and crust[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 128: 287-301.

<http://www.kcdz.com>